

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气PM ₁₀ 和PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对As(V)的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测

曾菁菁^{1,3}, 沈春竹^{2,3}, 周生路^{1,3*}, 陆春锋^{1,4}, 金志丰^{2,3}, 朱雁⁴

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省土地勘测规划院, 南京 210008; 3. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210008; 4. 南京南源土地开发利用咨询有限公司, 南京 210008)

摘要: 以江苏省常州市金坛区为例, 借鉴传统 LUR 模型思路, 考虑土壤重金属的源汇关系, 加入土壤属性因子, 构建 LUR-S 模型模拟预测了研究区土壤重金属含量空间分布, 并与传统 LUR 模型及普通克里格插值模型结果进行对比, 结果表明: ①研究区土壤重金属含量受到以土地利用为主的源因子及反映重金属在土壤中赋存环境的汇因子的共同影响。就源影响因子而言, 土壤 Cu、Zn 含量分别与2 000 m缓冲区内交通用地面积、2 000 m缓冲区内城市建设用地面积积极显著相关($P < 0.01$); 就汇影响因子而言, 土壤 Cr、Cu、Zn 含量与 OM、 C_{org} 、TC、TN 极显著相关($P < 0.01$)。②研究区土壤重金属 Pb、Cr、Cu、Zn 空间分布预测的 LUR-S 模型方程 R^2 较传统 LUR 模型分别提高了 0.041、0.406、0.102、0.501, 精度检验 R^2 较普通克里格插值模型分别提高了 0.147 7、0.011 6、0.231 0、0.081, RMSE 较普通克里格插值分别减少了 2.413、0.631、1.112、2.138, 表明考虑了源汇关系的 LUR-S 模型预测精度高于传统 LUR 模型和普通克里格插值模型; ③LUR-S 模型对污染较低、变异较小重金属空间分布预测的适用性较好, 而对污染较高、变异较大重金属则较差。

关键词: 土壤; 重金属; 空间分布; LUR 模型; 金坛区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0371-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201704024

Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals

ZENG Jing-jing^{1,3}, SHEN Chun-zhu^{2,3}, ZHOU Sheng-lu^{1,3*}, LU Chun-feng^{1,4}, JIN Zhi-feng^{2,3}, ZHU Yan⁴

(1. School of Geographic and Oceanographic, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Institute of Land Survey and Planning, Nanjing 210008, China; 3. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210008, China; 4. Nanjing Nanyuan Land Development and Utilization Consulting Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: Using the Jintan District of Changzhou City, Jiangsu Province as an example, the LUR model was used to study the spatial distribution of heavy metals and to simulate the spatial distribution of heavy metals in the study area. Compared with the traditional LUR model and the ordinary Kriging interpolation model, the following conclusions were obtained. ① The soil heavy metal content in the study area was highly and significantly correlated with land factors, with the main factor of land use and influencing factors of heavy metals in the soil environment ($P < 0.01$). In terms of influencing factors, the soil Cu and Zn contents were significantly correlated with the area related to traffic in a 2 000 m buffer area and 2 000 m buffer zone, respectively. The soil Cr, Cu, and Zn contents were significantly correlated with OM, C_{org} , TC, and TN ($P < 0.01$). ② The R^2 of the LUR-S models of the spatial distribution of the heavy metals, Pb, Cr, Cu, and Zn, in the study area were improved by 0.041, 0.406, 0.102, and 0.501, respectively, compared with the traditional LUR model. The accuracy test R^2 values were improved by 0.147 7, 0.011 6, 0.231 0, and 0.081, respectively; and the RMSE was reduced by 2.413, 0.631, 1.112, and 2.138, respectively. It was shown that the LUR-S model, which considered the source-sink relationship, had a higher accuracy than the traditional LUR model and ordinary Kriging interpolation model. ③ The LUR-S model was more suitable for the prediction of the spatial distribution of heavy metals with lower pollution and smaller variations, while results for the prediction of the heavy metals with higher pollution and larger variations were worse.

Key words: soil; heavy metals; spatial distribution; land use regression (LUR) model; Jintan District

随着城市化、工业化的发展,土壤重金属污染已成为一个全球关注的环境问题^[1]。由于土壤重金属污染在空间上具有分布复杂性、高度可变性以及局部偶然性特征,使得土壤重金属空间分布预测具有一定的难度^[2]。传统统计方法通过计算区域土壤重金属的均值^[3]、标准差、方差、变异系数^[4]等在一定程度上反映样本的总体特征,但无法定量刻画土壤空间变异的随机性和结构性。当前,地学统计^[5,6]、模糊聚类^[7,8]、神经网络^[9,10]等方法相继被

应用于土壤重金属的空间分异研究,以探索和改进土壤重金属的空间预测技术手段。土地利用回归(land use regression, LUR)模型是目前模拟城市尺

收稿日期: 2017-04-04; 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771243); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800305); 国土资源部公益性行业科研专项(20151001-03); 江苏省科技支撑计划项目(BE2015708)

作者简介: 曾菁菁(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境质量, E-mail: zjjclassic@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouisl@nju.edu.cn

度大气污染时空分异的常用方法之一^[11],模型的变量选择除土地利用类型外,会因为研究区不同及因变量不同而有所差异^[12~14]. 已有研究表明,不同土地利用下的土壤重金属累积状况存在较大差异^[15,16],然而传统 LUR 模型在土壤重金属空间预测中运用甚少,其原因与传统 LUR 模型在选取变量时仅考虑了以土地利用为主的源影响因子有关.

本文借鉴 LUR 模型建模思路,考虑土壤重金属的源汇关系,在体现重金属“源”的土地利用因子的基础上,加入影响重金属“汇”即赋存环境的土壤属性因子,构建适用于土壤重金属空间分布预测的 LUR-S 模型,并传统 LUR 模型及普通克里格插值模型进行对比,对 LUR-S 模型在土壤重金属污染预测研究上的可行性进行评估,对土壤重金属空间分布进行预测,分析其用于重金属污染研究的优点以及存在的问题,以探索区域土壤重金属空间分布预测的新方法.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区江苏省常州市金坛区地处江苏省南部,

2014 年末行政区域面积 976.7 km²,人口 55.34 万人,境内地势西高东低,海拔 -6 ~ 373 m,水网密布,年均降雨量 1 108.4 mm. 该区地处长江三角洲中枢地带,2014 年 GDP 达 471.48 亿元,城市化、工业化进程迅速,区内土壤受到不同程度的土壤重金属污染^[17],在长三角经济发达地区中具有代表性^[18].

1.2 数据来源

1.2.1 重金属含量及土壤理化性质数据

本研究所用的重金属含量及土壤性质数据来源于研究区多目标地球化学调查结果. 该调查将研究区划分成 2 km × 2 km 的网格,选取距离行政区边界大于 2 km 的网格作为采样点,共选取 180 个样点(图 1). 按照 5 点混合采样法采集 0 ~ 20 cm 表层土壤样品,四分法取分析样品约 1.5 kg. 经相应的土壤样品风干、研磨、过筛,进行相应的土壤重金属 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和理化性质 pH、有机质(OM)、总碳(TC)、有机碳(C_{org})、全氮、全磷、全含量测试分析^[19],重金属及土壤理化性质测定的仪器、方法和检验精度按照中国地质调查局《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DD2005-01)执行,具体测试方法及测试结果见表 1.

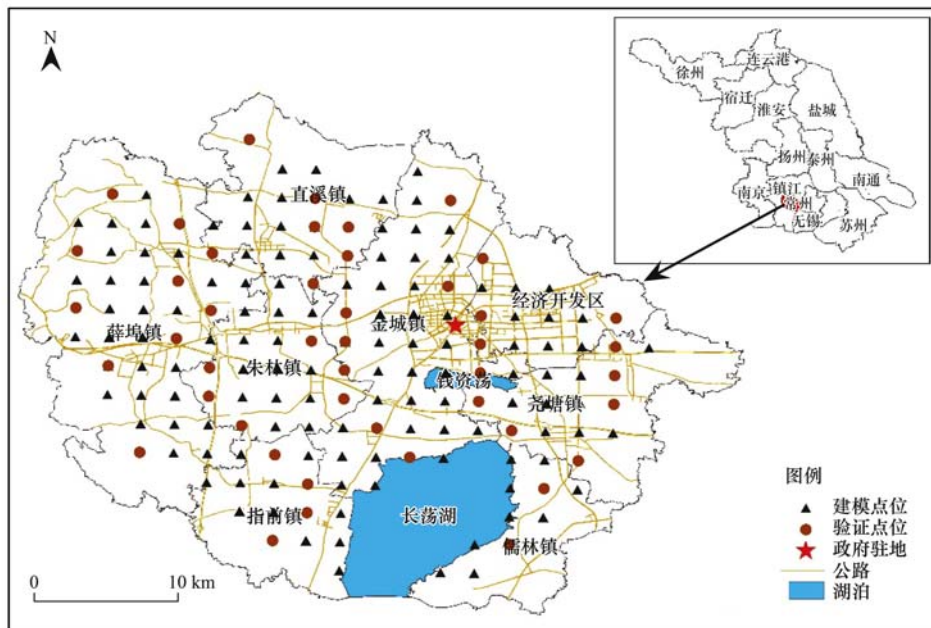


图 1 研究区位及采样点示意

Fig. 1 Map of the study area and sampling sites

1.2.2 土地利用数据

本研究所采用土地利用数据来源于江苏省 2014 年土地利用变更调查矢量数据. 根据土地利用现状分类标准,并综合考虑各种土地利用类型数量,将土地利用归并为 5 种类型:城市建设用地,农村建

设用地,交通运输用地,农用地,水域.

1.2.3 其他数据

其他数据包括人口密度数据、工业污染源数据、高程和坡度数据. 人口密度数据采用中国公里网格人口分布数据集^[21](2010 年,1 km × 1

km),以监测点所在位置的栅格值表示该点人口密度.工业污染源只考虑研究区内国家重点监控污染企业,从环保部网站获取监控企业基本信息,共

27 个.从国际科学数据服务平台地理空间数据云(Geospatial Data Cloud)获取研究区高程、坡度数据.

表 1 研究区土壤重金属及理化性质描述性统计及测试方法

Table 1 Statistical characteristics and testing methods for heavy metal concentrations and physical characteristics in the study area

指标	Mean	土壤背景值 ^[20]	SD	CV/%	测试方法
Cd/mg·kg ⁻¹	0.192	0.09	0.217	112.485	石墨炉原子吸收法
Pb/mg·kg ⁻¹	30.70	22.6	26.968	87.836	石墨炉原子吸收法
Cr/mg·kg ⁻¹	78.98	76.4	6.531	8.270	原子吸收分光光度法
Cu/mg·kg ⁻¹	26.38	24.0	5.424	20.558	原子吸收分光光度法
Zn/mg·kg ⁻¹	69.55	65.8	17.319	24.903	原子吸收分光光度法
pH	6.64	—	0.717	10.796	电位法
OM/%	2.20	—	0.548	24.921	重铬酸钾容量法
TC/%	1.38	0.76	0.315	22.728	管式炉燃烧非水滴定
C _{org} /%	1.28	0.26	0.318	24.921	重铬酸钾分光光度法
TN/mg·kg ⁻¹	1393	460	314.426	22.578	凯氏法
TP/mg·kg ⁻¹	667	528	186.939	28.018	碱熔钼锑抗分光光度法
TK/%	1.566	1.86	0.146	9.331	原子吸收分光光度法

1.3 LUR 模型的改进与构建

本研究利用 SPSS 22.0 的双变量相关性分析和多元线性逐步回归功能,结合 Arcgis 10.2 的空间分析功能,综合考虑土壤重金属空间分布的影响因素,分析变量和土壤重金属含量之间的相关性,构建适用于区域土壤重金属空间分布预测的 LUR + Soil 的 LUR-S 模型.模型的构建分为模型变量的生成与筛选、多元线性回归、模型精度检验与对比、区域重金属含量模拟 4 个部分.

1.3.1 模型变量的生成与筛选

本研究除选取传统 LUR 模型中的土地利用、工业污染源距离、地形地貌等作为影响土壤重金属含量分布的因素外,将土壤理化性质指标作为土壤属性因子纳入模型变量,以反映土壤重金属的赋存条件.为了比较重金属含量与不同空间尺度地理空间要素相关性的高低,LUR-S 模型采用缓冲区分析刻画不同尺度的影响,并识别最高相关性的空间尺度.在 ArcGIS 10.2 中以 180 个监测点为中心建立系列缓冲区,统计不同半径缓冲区内影响因子数值,并分析影响因子与重金属含量的相关性.本研究参照已有区域尺度 LUR 模型的缓冲半径^[22~24],确定 500、1 000、2 000 m 共 3 个系列缓冲半径,并提取各种土地利用类型占地面积.

1.3.2 多元线性回归

工业污染源距离、土壤属性因子、人口密度、高程等均以监测值表征,不涉及缓冲区分析.针对土地利用(5 种地类)、道路交通,缓冲区分析后共得到 18(3×6)个影响因子;再加上工业污染源距

离、土壤属性因子、人口密度、高程和坡度,共计 29 个影响因子.在 SPSS 22.0 中将单个影响因子与重金属含量进行双变量相关分析,筛选出与重金属含量显著相关($P < 0.05$)的影响因子.为了降低后续多元线性回归中同类变量不同缓冲半径下影响因子间的共线性,参照 Wu 等^[25]提出的建模方法,先选出同类预测变量中与重金属含量相关性最高的影响因子,然后去除与该因子相关性较高($R > 0.6$)的其他同类因子,最后将剩下的所有影响因子与监测点土壤重金属含量进行逐步线性回归,得到多元线性回归方程,即研究区的 LUR-S 模型.

1.3.3 模型精度检验

采用采三留一验证法对模型精度进行评估^[26].将 180 个样点随机分为建模点位(135 个)和验证点位(45 个)两部分,先用建模点位中 135 个样点的土壤 Cu、Zn 含量与研究区 LUR 模型中的预测变量进行回归,利用回归方程预测验证点位(45 个)土壤重金属含量,并将该点的预测值和实测值比较;同时,运用 Arcgis 10.2 以建模点位数据建立普通克里格插值模型,同理比较普通克里格插值模型中验证点位的预测值与实测值,最后对两种模型进行精度对比.

1.3.4 区域重金属含量模拟与比较

为了得到研究区土壤重金属含量空间分布,在 Arc GIS 10.2 中生成 1 km×1 km 规则格点,依据区域 LUR-S 模型得到格点土壤重金属含量,再将格点土壤重金属含量赋给相应格网,最终得到研究区土

壤重金属含量空间分布,并与普通克里格插值模型模拟结果进行比较.

2 结果与分析

2.1 双变量相关性分析

将研究区土壤重金属含量与 29 个变量进行双变量相关性分析,其中, X1 ~ X22 为体现重金属“源”的源影响因子, X23 ~ X29 为影响重金属“汇”即赋存环境的汇影响因子,结果见表 2. 从中可知,所选变量在解释 Cr、Cu、Zn 含量时,极显著相关($P < 0.01$)的变量较多;在解释 Pb 含量时,不存在极显著相关的变量,但部分变量显著相关($P < 0.05$);在解释 Cd 含量时,不存在显著相关的变量,具体原

因将在讨论部分进一步阐述. 其中,与 Pb 含量显著相关的变量共 6 个,含 2 个源影响因子和 4 个汇影响因子;与 Cr 含量显著相关的变量共 9 个,含 3 个源影响因子和 6 个汇影响因子;与 Cu 含量显著相关的变量共 15 个,含 9 个源影响因子和 6 个汇影响因子;与 Zn 含量显著相关的变量共 16 个,含 9 个源影响因子和 7 个汇影响因子. 就源影响因子而言,Pb、Cu、Zn 与周边交通用地面积及道路总长度显著相关,Cr、Cu、Zn 与周边城市建设用地面积、到污染企业平均距离与高程显著相关. 就汇影响因子而言,Cr、Cu、Zn 与 OM、TC、 C_{org} 、TN 极显著相关,Pb 与 OM、TC、 C_{org} 、TN 显著相关,Cr、Cu、Zn 与 TP、TK 极显著相关,Zn 与 pH 极显著相关.

表 2 重金属含量与影响因子相关分析结果¹⁾

Table 2 Correlation analysis between heavy metal content and influencing factors

变量	R(Cd)	R(Pb)	R(Cr)	R(Cu)	R(Zn)
X1: 500 m 缓冲区内农用地面积/hm ²	0.034	0.104	0.005	0.049	0.038
X2: 1 000 m 缓冲区内农用地面积/hm ²	0.013	0.041	-0.013	0.011	-0.060
X3: 2 000 m 缓冲区内农用地面积/hm ²	0.002	0.036	0.004	0.031	-0.079
X4: 500 m 缓冲区内水体面积/hm ²	-0.132	-0.059	0.015	0.045	0.135
X5: 1 000 m 缓冲区内水体面积/hm ²	-0.114	-0.044	0.026	0.078	0.175 *
X6: 2 000 m 缓冲区内水体面积/hm ²	-0.100	-0.020	-0.006	0.068	0.170 *
X7: 500 m 缓冲区内城市建设用地面积/hm ²	0.028	0.030	0.043	0.114	0.163
X8: 1 000 m 缓冲区内城市建设用地面积/hm ²	-0.043	-0.064	0.110	0.120	0.226 **
X9: 2 000 m 缓冲区内城市建设用地面积/hm ²	-0.038	-0.035	0.181 *	0.189 *	0.298 **
X10: 500 m 缓冲区内农村建设用地面积/hm ²	0.102	0.075	-0.021	0.038	-0.011
X11: 1 000 m 缓冲区内农村建设用地面积/hm ²	0.170	0.171	0.105	0.155	0.026
X12: 2 000 m 缓冲区内农村建设用地面积/hm ²	0.173	0.114	0.124	0.111	0.119
X13: 500 m 缓冲区内交通用地面积/hm ²	-0.091	0.044	0.125	0.202 *	0.136
X14: 1 000 m 缓冲区内交通用地面积/hm ²	-0.051	0.217 *	0.077	0.212 *	0.093
X15: 2 000 m 缓冲区内交通用地面积/hm ²	0.019	0.156	0.137	0.256 **	0.187 *
X16: 500 m 缓冲区内道路总长度/km	-0.088	0.047	0.130	0.212 *	0.133
X17: 1 000 m 缓冲区内道路总长度/km	-0.051	0.218 *	0.075	0.212 *	0.093
X18: 2 000 m 缓冲区内道路总长度/km	0.020	0.158	0.136	0.255 **	0.187 *
X19: 到污染企业平均距离/km	0.040	-0.058	-0.351 **	-0.421 **	-0.422 **
X20: 高程/m	0.053	-0.045	-0.211 *	-0.382 **	-0.479 **
X21: 坡度/°	-0.048	-0.031	0.025	-0.133	-0.162
X22: 人口/万人·km ⁻²	0.022	-0.020	0.060	0.068	0.211 *
X23: pH 值	-0.009	0.005	0.074	0.112	0.283 **
X24: OM/%	0.121	0.203 *	0.370 **	0.583 **	0.524 **
X25: TC/%	0.126	0.220 *	0.379 **	0.600 **	0.564 **
X26: C_{org} /%	0.129	0.218 *	0.369 **	0.593 **	0.510 **
X27: TN/mg·kg ⁻¹	0.126	0.190 *	0.364 **	0.581 **	0.512 **
X28: TP/mg·kg ⁻¹	0.014	-0.024	0.362 **	0.482 **	0.694 **
X29: TK/%	-0.132	-0.047	0.591 **	0.554 **	0.793 * *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.05$

2.2 LUR-S 模型构建

由于 Cd 与所选变量无显著相关关系,故不构建 Cd 的 LUR-S 模型. 经逐步回归,最后得到研究区土壤 Pb、Cr、Cu、Zn 含量的 LUR-S 模型与传统 LUR 模型(不含汇影响因子)如表 3 所示. 基于

LUR-S 模型的 Pb、Cr、Cu、Zn 含量回归方程 R^2 分别为 0.088、0.529、0.550 和 0.772, F 检验统计量分别为 6.367 (Sig. = 0.002)、23.738 (Sig. = 0.000)、41.596 (Sig. = 0.000) 和 113.339 (Sig. = 0.000),回归方程有效. Cr、Cu、Zn 的 LUR-S 模型

表 3 基于传统 LUR 模型与改进 LUR-S 模型的重金属含量线性回归方程

Table 3 Linear regression equations for heavy metal content based on the LUR model and LUR-S model

模型	方程	R^2	F	Sig.
传统 LUR	$Pb = 21.585 + 0.0001 \times X17$	0.047	6.620	0.011
	$Cr = 95.386 - 0.365 \times X19$	0.123	17.710	0.000
	$Cu = 36.685 + 0.030 \times X18 - 0.264 \times X19$	0.460	17.725	0.000
	$Zn = 71.773 + 0.019 \times X9 - 0.577 \times X20$	0.277	25.106	0.000
LUR-S 模型	$Pb = -16.744 + 0.001 \times X17 + 27.340 \times X25$	0.088	6.367	0.002
	$Cr = 31.137 + 0.006 \times X9 - 0.326 \times X19 + 0.272 \times X20 + 8.268 \times X26 - 0.010 \times X28 + 28.839 \times X29$	0.529	23.738	0.000
	$Cu = 3.627 + 0.031 \times X18 - 0.111 \times X19 + 6.893 \times X26 + 9.029 \times X29$	0.562	41.596	0.000
	$Zn = -43.015 + 0.020 \times X9 + 11.674 \times X25 + 0.009 \times X28 + 45.320 \times X29$	0.778	113.339	0.000

中所有单个预测变量均在 1% 显著性水平下通过显著性检验, Pb 的 LUR-S 模型中所有单个预测变量均在 5% 显著性水平下通过显著性检验, 说明单个解释变量分别对被解释变量有显著的线性关系. 在 Pb、Cr、Cu、Zn 含量预测中, LUR-S 模型的 R^2 较传统 LUR 模型分别提高了 0.041、0.406、0.102、0.501.

根据 LUR-S 模型方程可知, 就源影响因子而言, Pb 含量与 1 000 m 缓冲区内道路总长度呈正相关关系; Cr 含量与 2 000 m 缓冲区内城市建设用地

呈正相关关系, 与样点到污染企业平均距离呈负相关关系; Cu 含量与 2 000 m 缓冲区内道路总长度呈正相关关系, 与样点到污染企业平均距离呈负相关关系; Zn 含量与 2 000 m 缓冲区内城市建设用地呈正相关关系. 就汇影响因子而言, TC、 C_{org} 、TP、TK 为影响土壤重金属含量的重要变量.

2.3 模型精度检验及与普通克里格插值精度对比
通过两种模型的预测值与实测值的对比(图 2), 结合模型相关系数可知, LUR-S 模型的相关指数 R^2 高于普通克里格插值模型. 在 Pb、Cr、Cu、Zn

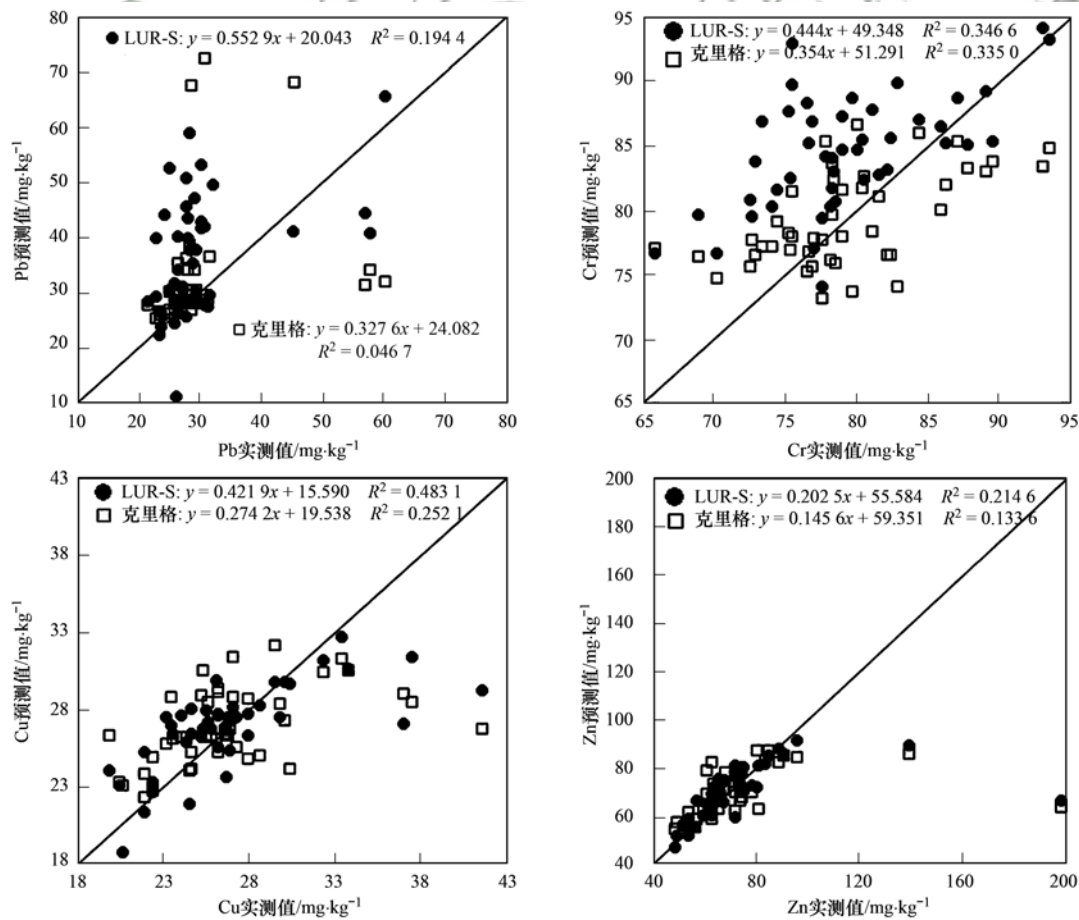


图 2 LUR-S 模型和普通克里格插值模型的重金属含量预测值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between predict values and measured value of LUR-S model and the original Kriging model

的空间分布预测中, LUR-S 模型的 R^2 分别为 0.194 4、0.346 6、0.483 1、0.214 6, 较普通克里格插值分别提高了 0.147 7、0.011 6、0.231 0、0.081; LUR-S 模型的 RMSE 分别为 12.247、4.812、3.229、21.506, 较普通克里格插值分别减小了 2.413、0.631、1.112、2.138. 两种模型的预测值-实测值散点图基本在 1:1 线上下波动, Pb、Cu、Zn 的 LUR-S 模型散点波动范围小于普通克里格插值散点, 而 Cr 的 LUR-S 模型的预测值较实测值偏高. 总体而言, LUR-S 模型的精度高于普通克里格插值模型. 此外, 两种模型预测误差较大的散点均为实测值较高的样点, 说明无论 LUR-S 模型还是普通克里格插值模型, 对于土壤重金属含量较高的区域预测精度较低, 其原因可能在于研究区存在局部土壤重金属污染状况.

2.4 区域重金属含量空间分布预测

对比 LUR-S 模型与普通克里格插值模型所生成的重金属含量空间分布预测图(图 3)可以发现, 两种方法中土壤重金属在研究区全域内的空间分布趋势大致相同, 而细节有所差异. 其中, 基于 LUR-S 模型预测下的 Pb 含量在路网密集的地区高于克里格插值模型预测值, 基于 LUR-S 模型预测下的 Cr 含量在海拔较高的西部地区出现高值, Cu 含量在金坛区的中部地区较高, 东部地区较低, 其原因在于研究区中部地区路网较周边地区更密集, Zn 含量在中部和北部地区较高, 东部和南部地区较低, 其原因在于研究区中部、北部地区社会经济较发达, 城市建设用地面积较大. 总体上看, 研究区土壤重金属含量在城市中心地区较高, 并呈现出由中部向四周逐渐减少的趋势.

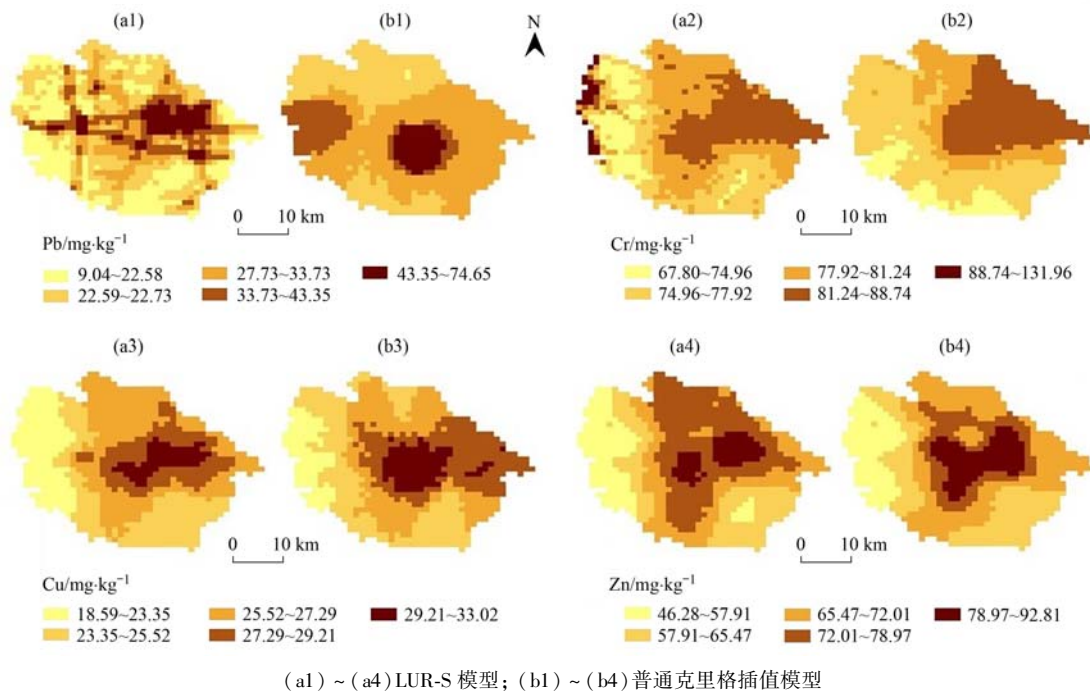


图 3 LUR-S 模型与普通克里格插值模型的土壤重金属含量空间分布预测及对比

Fig. 3 Soil heavy metal content spatial distribution prediction and the comparison of LUR-S model and the original Kriging interpolation model

3 讨论

对比图 3 两种模型结果可以发现, 克里格插值预测结果中土壤重金属空间分布较为简单, LUR-S 模型结果中土壤重金属空间分布更加复杂多样, 对重金属空间分布状况揭示更为精细. 其原因在于, 相较于基于地统计学理论单纯考虑因变量空间相关性的普通克里格插值模型, LUR-S 模型综合考虑了各个样点周边不同的土地利用状况及样点的土壤理

化性质等因素, 并通过构建线性回归方程的手段来预测研究区域内的污染物空间分异, 从而更有效地揭示出小范围内重金属的空间差异.

本研究中除 Cd 元素外, LUR-S 模型在对土壤 Pb、Cr、Cu、Zn 空间分布预测效果明显优于传统 LUR 模型及普通克里格插值模型, 其方程 R^2 高于传统 LUR 模型, 精度检验 R^2 高于普通克里格插值, RMSE 低于普通克里格插值, LUR-S 模型在土壤重金属空间分布预测中具有较好的适用性. 表 1 可

知,污染相对较高的 Cd、Pb 的 CV 值分别为 112.5% 和 87.8%,而污染相对较低的 Cr、Cu、Zn 分别为 8.3%、20.6% 和 24.9%,明显低于 Cd、Pb 的 CV 值;根据表 3,Zn 的 LUR-S 模型拟合效果最优,Cr、Cu 次之,Pb 拟合效果较差,Cd 的 LUR-S 模型因拟合未能通过检验而无法成立。根据上述可以发现,本研究中 LUR-S 模型对污染相对较低、变异相对较小的重金属元素空间分布拟合精度较高,适用性较好;而对污染相对较高、变异相对较大元素空间分布拟合精度较低,适用性较差。其原因可能在于,研究区存在 Cd、Pb 局部污染的情况。为此,对变异较大的重金属空间分布预测,可以通过进一步增加反映造成重金属局部污染的关联指标来提高 LUR-S 模型的预测精度和适用性。

4 结论

(1)研究区土壤重金属含量受到以土地利用为主的源因子及反映重金属在土壤中赋存环境的汇因子的共同影响。根据 LUR-S 模型,对研究区土壤重金属含量影响较大的因子包括样点周边道路长度、城市建设用地面积、距工业污染源距离以及土壤中 TK、TC、TP、 C_{org} 含量等,土壤 Cu、Zn 含量分别与 2 000 m 缓冲区内交通用地面积、2 000 m 缓冲区内城市建设用地面积显著相关,土壤 Cr、Cu、Zn 含量与 OM、 C_{org} 、TC、TN 极显著相关,汇影响因子是构建 LUR-S 模型的重要因素。

(2)LUR-S 模型可较好地研究区土壤重金属 Pb、Cr、Cu、Zn 含量进行空间分布预测。研究区土壤重金属空间分布预测的 LUR-S 模型方程 R^2 、RMSE 较传统 LUR 模型、普通克里格插值模型有明显提高。相较于普通克里格插值模型所得到的单一梯度空间分布预测结果,LUR-S 模型因综合考虑了土壤重金属的赋存环境,能够更有效揭示小范围内的空间差异。

(3)LUR-S 模型对污染较低、变异较小重金属空间分布预测的适用性较好,而对污染较高、变异较大重金属空间分布预测的适用性则较差。

参考文献:

- [1] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3996-4003.
Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, et al. Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- [2] Amini M, Afyuni M, Fathianpour N, et al. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation[J]. Geoderma, 2005, **124**(3-4): 223-233.
- [3] Kelepertzis E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece[J]. Geoderma, 2014, **221-222**: 82-90.
- [4] Shao D W, Zhan Y, Zhou W J, et al. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta Region: field survey and meta-analysis [J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 329-336.
- [5] Ha H, Olson J R, Bian L, et al. Analysis of heavy metal sources in soil using kriging interpolation on principal components[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(9): 4999-5007.
- [6] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 270-279.
- [7] 郭燕, 田延峰, 吴宏海, 等. 基于多源数据和模糊 k-均值方法的农田土壤管理分区研究[J]. 土壤学报, 2013, **50**(3): 441-447.
Guo Y, Tian Y F, Wu H H, et al. Zoning of soil management based on multi-sources data and Fuzzy-k means [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(3): 441-447.
- [8] 谢军, 秦承志, 肖桂荣, 等. 模糊聚类方法在南方红壤小流域土壤属性制图中的应用——以长汀朱溪河小流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, **13**(5): 132-139.
Xie J, Qin C Z, Xiao G R, et al. Soil property mapping using fuzzy clustering method in small watershed of the red soil region in southern China: a case study of Zhuxi Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(5): 132-139.
- [9] 刘新颜, 曹晓仪, 董治宝. 基于 T-S 模糊神经网络模型的榆林市土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学, 2013, **33**(6): 741-747.
Liu X Y, Cao X Y, Dong Z B. Soil wind erosion risk assessment in Yulin City using T-S fuzzy neural network model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(6): 741-747.
- [10] 陈飞香, 程家昌, 胡月明, 等. 基于 RBF 神经网络的土壤铬含量空间预测[J]. 地理科学, 2013, **33**(1): 69-74.
Chen F X, Cheng J C, Hu Y M, et al. Spatial prediction of soil properties by RBF neural network [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(1): 69-74.
- [11] De Hoogh K, Gulliver J, Van Donkelaar A, et al. Development of West-European PM_{2.5} and NO₂ land use regression models incorporating satellite-derived and chemical transport modelling data[J]. Environmental Research, 2016, **151**: 1-10.
- [12] Weichenthal S, Van Ryswyk K, Goldstein A, et al. A land use regression model for ambient ultrafine particles in Montreal, Canada: a comparison of linear regression and a machine learning approach[J]. Environmental Research, 2016, **146**: 65-72.
- [13] Gaeta A, Cattani G, Di Menno di Bucchianico A, et al. Development of nitrogen dioxide and volatile organic compounds land use regression models to estimate air pollution exposure near an Italian airport [J]. Atmospheric Environment, 2016, **131**: 254-262.
- [14] 陈浩. 基于土地利用回归模型的土壤重金属空间分布预

- 测——昆山市为例[D]. 南京: 南京大学, 2014. 1-27.
- Chen H. Application of land use regression to predict heavy metal distribution in soil in Kunshan City, China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. 1-27.
- [15] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
- Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [16] 李建国, 濮励杰, 廖启林, 等. 无锡市土壤重金属富集的梯度效应与来源差异[J]. 地理科学, 2014, **34**(4): 496-504.
- Li J G, Pu L J, Liao Q L, *et al.* The sources and gradient effect of soil heavy metal concentrations in Wuxi City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(4): 496-504.
- [17] 戴靓, 姚新春, 周生路, 等. 长三角经济发达区金坛市土地生态状况评价[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(8): 249-257.
- Dai L, Yao X C, Zhou S L, *et al.* Land ecological assessment of Jintan city in Yangtze River Delta with highly developed economy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(8): 249-257.
- [18] 余泓, 潘剑君, 李加加, 等. 长三角地区农用地土壤肥力特征及综合评价——以朱林镇为例[J]. 土壤通报, 2017, **48**(2): 372-379.
- Yu H, Pan J J, Li J J, *et al.* Characteristics of soil fertility and comprehensive evaluation on agricultural land in the Yangtze River Delta—a Case Study of Zhulin Town[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 372-379.
- [19] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 几种区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1309-1316.
- Su Q L, Zhou S L, Yi H M, *et al.* A comparative study of different assessment methods of regional heavy metal pollution [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1309-1316.
- [20] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- Liao Q L, Liu C, Xu Y, *et al.* Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- [21] 付晶莹, 江东, 黄耀欢. 中国公里网格人口分布数据集[J]. 地理学报, 2014, **69**(S): 41-44.
- [22] Liu C, Henderson B H, Wang D F, *et al.* A land use regression application into assessing spatial variation of intra-urban fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and nitrogen dioxide (NO_2) concentrations in City of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 607-615.
- [23] Cordoli M, Pironi C, De Munari E, *et al.* Combining land use regression models and fixed site monitoring to reconstruct spatiotemporal variability of NO_2 concentrations over a wide geographical area[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1075-1084.
- [24] Ross Z, Jerrett M, Ito K, *et al.* A land use regression for predicting fine particulate matter concentrations in the New York City region [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(11): 2255-2269.
- [25] Wu J S, Li J C, Peng J, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial variation of $PM_{2.5}$ in Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(9): 7045-7061.
- [26] 吴健生, 谢舞丹, 李嘉诚. 土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 413-419.
- Wu J S, Xie W D, Li J C. Application of land-use regression models in spatial-temporal differentiation of air pollution [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 413-419.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F _{0.3} -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)